

3 COMPARAÇÃO TEÓRICA ENTRE A NBR 7190/97 E OUTROS DOCUMENTOS NORMATIVOS

Os critérios dos códigos normativos de outros países são, a seguir, confrontados com os da norma brasileira, buscando-se destacar as suas similaridades e/ou discordâncias. De início, enfatiza-se que não faz parte do escopo deste trabalho a discussão e aplicabilidade dos coeficientes de modificação propostos pelas normas de outros países e não contemplados pela NBR 7190/97. Mas é possível salientar que algumas normas – tais como as norte-americanas – são muito minuciosas neste aspecto do dimensionamento, permitindo assim que o projetista tenha um controle preciso das condições influentes nas propriedades mecânicas da madeira.

No capítulo anterior foram apresentados os critérios gerais para o cálculo das peças comprimidas e flexocomprimidas. Todavia, as comparações que se propõem em seguida contemplam apenas as expressões que tratam da inspeção das suas condições de estabilidade, o que se justifica por ser um critério polêmico da NBR 7190/97. As comparações deste capítulo, assim como as simulações propostas no próximo, se restringem a uma solicitação de flexo-compressão reta, como indicado na figura abaixo.

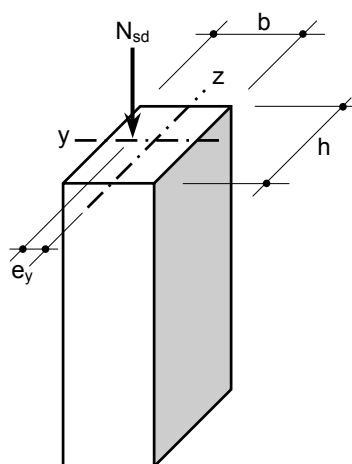


Figura 3.1 – Peça solicitada à flexo-compressão.

3.1 Confrontação com a DIN 1052/88

O índice de esbeltez, segundo as recomendações do texto normativo alemão, é calculado de maneira tradicional e tem seu valor limitado em 150 para as peças comprimidas. Nesse aspecto, tanto em formato quanto na imposição da esbeltez máxima, é notável a semelhança com a NBR 7190/97. A norma alemã acrescenta, ainda, várias hipóteses de vinculação das extremidades das barras, indicando expressões para a determinação dos comprimentos de flambagem de pilares que estão associados com treliças, de peças que compõem pórticos bi ou triarticulados, arcos, etc.

O procedimento proposto pela DIN 1052/88 para a verificação das peças comprimidas contra a flambagem compara a tensão atuante na peça com a tensão admissível do material, sendo essa afetada por um coeficiente de flambagem, ω , que reduz as tensões admissíveis à compressão paralela às fibras à medida em o índice de esbeltez da peça aumenta. A Figura 3.2 ilustra a influência do coeficiente de flambagem.

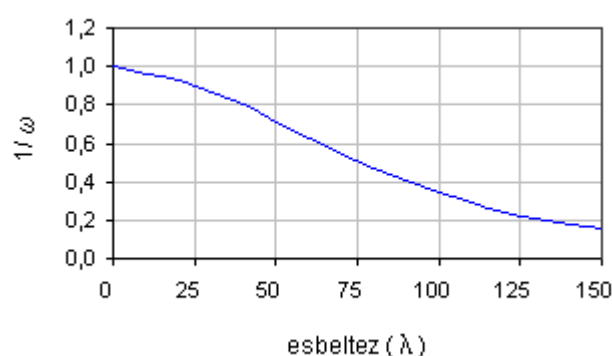


Figura 3.2 – Fator de esbeltez da norma alemã.

Com esta recomendação, a DIN 1052/88 emprega uma função que é contínua ao longo de todo o intervalo de esbeltez admitido, facilitando sobremaneira o processo de dimensionamento. Comparando-a com a norma brasileira, nota-se um distanciamento significativo entre os critérios propostos para tal solicitação. A NBR 7190/97 considera a hipótese de compressão centrada apenas em peças curtas, não havendo a influência da esbeltez neste caso. Por outro lado, a norma alemã considera a participação da esbeltez nessas barras, reduzindo as tensões admissíveis à compressão paralela às fibras em aproximadamente 20% quando $\lambda = 40$.

Na avaliação das peças sujeitas à flexo-compressão, a DIN 1052/88 propõe uma verificação padrão da resistência e uma análise das condições de estabilidade, combinando linearmente as tensões resultantes deste tipo de sollicitação – Equações [2.54] e [2.55]. Nessa última, os coeficientes de flambagem afetam tanto a tensão admissível à compressão paralela às fibras como a tensão admissível à flexão. A parcela relativa ao esforço axial é influenciada pelo coeficiente ω e a quota devida ao momento fletor é afetada pelo índice k_B , que provém da verificação da estabilidade lateral das peças flexionadas. A variação do fator k_B em função do índice de esbeltez λ_B está representada na Figura 3.3, sendo válida para peças de seção transversal retangular.

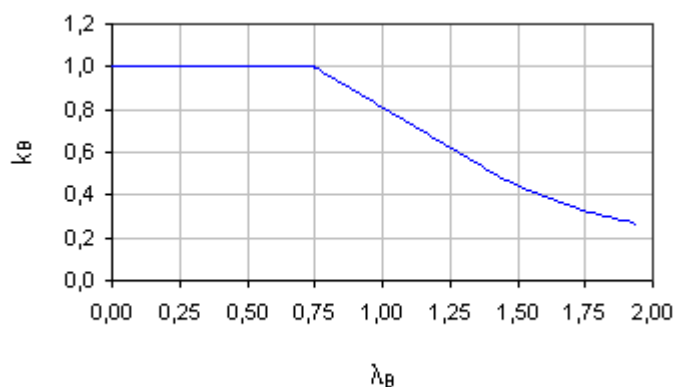


Figura 3.3 – Variação do fator de esbeltez para peças flexionadas.

Empregando-se os dados das *softwoods* e *hardwoods* listadas na norma alemã, é possível se observar que $\lambda_B < 0,75$ para barras retangulares contraventadas a cada 3 metros, aproximadamente, tornando sem efeito (unitário) o parâmetro k_B para peças freqüentemente encontradas nas estruturas.

Os momentos fletores que aparecem nas Equações [2.54] e [2.55] são momentos de primeira ordem. Observa-se ainda que essas equações conduzem a uma correta transição para a compressão axial ou flexão pura, o que não acontece com os critérios propostos pela norma brasileira, especialmente porque na NBR 7190/97 a tensão normal de flexão é relacionada com a resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,d}$) e não com a tensão admissível à flexão, como faz a norma alemã. Ambas, porém, não são suficientemente claras quanto à validade das expressões nos casos de flexo-compressão oblíqua.

Enquanto são apresentados os critérios para o dimensionamento das peças comprimidas ou flexocomprimidas, nenhuma excentricidade obrigatória é recomendada pela DIN 1052/88. Todavia, quando ela apresenta uma verificação alternativa para a segurança estrutural pela teoria de segunda ordem, afirma que uma excentricidade do carregamento é inevitável e recomenda que a mesma seja calculada segundo a Equação [2.60].

3.2 Confrontação com a AS 1720.1/97

Ao propor que a esbeltez seja determinada, em cada direção, a partir do menor de dois valores, conforme Equações [2.68] a [2.71], a norma australiana conduz o projetista a averiguar também a probabilidade de ocorrência da flambagem segundo o eixo de maior inércia. Esse é um ponto positivo deste documento normativo e uma das críticas feitas à NBR 7190/97.

O indicador da esbeltez proposto pela AS 1720.1/97 relaciona o comprimento de flambagem com a largura ou altura da seção transversal – como faz a norma canadense – diferenciando-se, assim, do modelo empregado pela norma brasileira. Na prescrição do comprimento efetivo de flambagem, o código australiano fornece possibilidades de vinculação das extremidades das barras não previstas pela norma brasileira. Outra diferença constatada no código australiano é a não fixação de um limite superior para a esbeltez.

Quando o cálculo do índice de esbeltez é governado pela distância entre os contraventamentos, em uma seção transversal retangular como a mostrada na Figura 3.1, é possível se observar que $\lambda_{sy} = L_{ay}/h$. Para um índice de esbeltez determinado segundo a norma australiana igual a 20, por exemplo, obtém-se a seguinte relação para o modelo tradicional de esbeltez:

$$\lambda_y = \frac{L_{ay}}{i_y} \cong 70 \quad [3.1]$$

A constante material, ρ , que multiplica o coeficiente de esbeltez, λ_s , depende da proporção das ações que é de longa duração, ou seja, é expressa como um índice entre as ações variáveis (temporárias) e o total das ações, sendo calculada segundo expressões empíricas para peças comprimidas ou flexionadas. Essa constante inclui os efeitos da curvatura inicial

da peça, previamente assumida pelo código australiano, e limitada pela deformação lateral mostrada na Equação [2.72]. Nota-se que, para um valor de $L/h = 25$, a curvatura inicial relativa é calculada por $\Delta = L/300$, igualando-se à expressão proposta para a excentricidade accidental pela NBR 7190/97.

Para simplificar o dimensionamento, a AS 1720.1/97 introduziu o fator de estabilidade, k_{12} , no cálculo do esforço resistente de projeto à compressão paralelas às fibras, sendo um fator de redução que engloba vários parâmetros relacionados com a estabilidade. Esse parâmetro é determinado de forma distinta para três intervalos de esbeltez – conforme as Equações [2.65] a [2.67] –, equivalendo às peças curtas, medianamente esbeltas e esbeltas, respectivamente, e esboçado na Figura 3.4. No primeiro intervalo, em que $\rho\lambda_s \leq 10$, a resistência da peça é governada pela capacidade do material à compressão paralela às fibras, como na NBR 7190/97. Para $10 < \rho\lambda_s \leq 20$, a resistência é afetada por uma interação – adotada como linear – entre a flambagem e a resistência. Finalmente, para $\rho\lambda_s > 20$ a ruptura se dá por flambagem, aproximando-se da fórmula elástica de Euler.

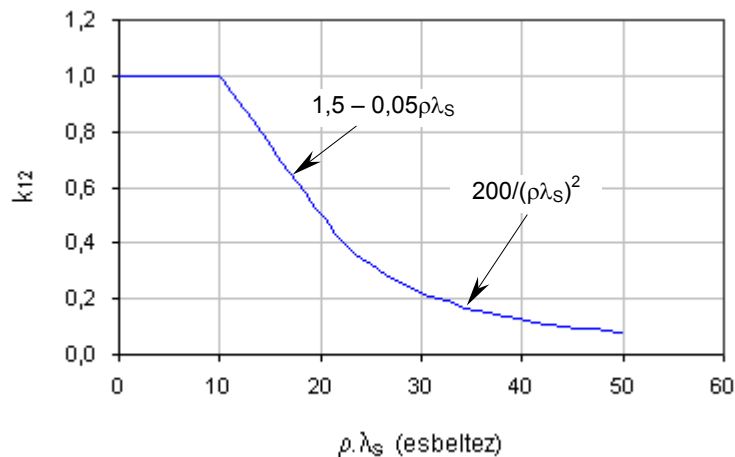


Figura 3.4 – Fator de esbeltez da norma australiana.

Embora o gráfico do fator de estabilidade e, conseqüentemente, do esforço axial de projeto à compressão paralela às fibras, não apresente nenhuma descontinuidade – tal como o equivalente gerado segundo a norma brasileira –, os critérios da norma australiana não avançam na idéia de se ter uma única equação, ideal para a simplificação do processo.

A AS 1720.1/97 impõe que duas expressões sejam verificadas, simultaneamente, quando a peça está sujeita à flexo-compressão reta. A Figura 3.5 ilustra as imposições normativas para estas peças, com a flexão ocorrendo somente sobre o eixo z. A dupla verificação faz com que apareça uma região – limitada superiormente pela curva azul em praticamente toda a sua extensão – na qual todos os pontos ali contidos atendem às condições da norma australiana. Dependendo das dimensões da peça, as curvas ilustradas podem assumir configurações tais que a sua disposição seja invertida. Os valores referem-se à madeira de classificação tipo F11, conforme a AS 1720.1/97, e para seção transversal 75 x 100 mm.

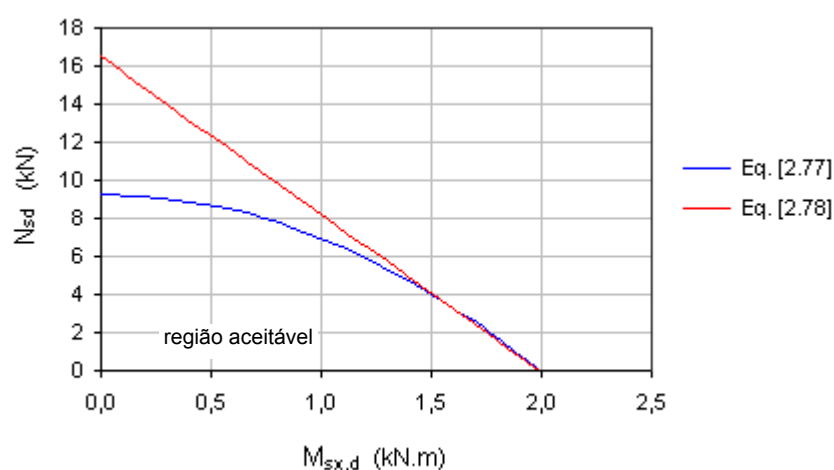


Figura 3.5 – Condições de estabilidade na flexo-compressão segundo a norma australiana.

As expressões gerais sugeridas pela norma australiana referem-se ao caso da flexo-compressão oblíqua, combinando empiricamente as tensões resultantes deste modo de sollicitação. Heaney & Kneen (1999) comentam que, assim, a proposta do código australiano é muito semelhante àquela sugerida pelo EUROCODE 5/93 que, para peças longas de seção retangular, substitui os termos ao quadrado por coeficientes $k_m = 0,7$ e aplica uma variação adicional para peças curtas, mas que produz resultados de interação similares.

Na transição para o caso da flexão reta, a Equação [2.77] fornece uma verificação contra a flambagem da peça sobre o eixo de menor inércia combinada com a flambagem lateral-torsional. Já a Equação [2.78] permite uma verificação contra a flambagem sobre o eixo de maior inércia, aumentada pela presença de um momento de primeira ordem sobre o eixo de maior inércia. Nessas expressões, tanto o momento fletor (de 1ª ordem) quanto o esforço

axial de compressão devem ser tomados com sinal positivo. Mesmo assim, ao serem simplificadas quaisquer dessas equações, a transição é correta para o caso da compressão axial e da flexão pura.

Considerando-se uma peça flexocomprimida, como a indicada na Figura 3.1, o momento solicitante de cálculo será gerado pela excentricidade do esforço axial. Substituindo-se o valor desse momento fletor nas Equações [2.77] e [2.78] é fácil isolar o termo da compressão axial e obter-se, assim, uma expressão para dimensionamento desse caso particular.

A Figura 3.6 ilustra a superfície limite da condição de estabilidade de um pilar submetido à ação da flexo-compressão oblíqua, segundo as orientações da norma australiana, e que corresponde à superfície acima do plano horizontal que passa pelo ponto zero (trecho mais claro do diagrama). A região localizada abaixo do plano horizontal, apesar de representada no gráfico, não é admitida pela norma, que exige a adoção de sinais positivos para todas as parcelas. No plano $N_d \times M_y$ observa-se que a combinação é linear e no plano ortogonal é parabólica.

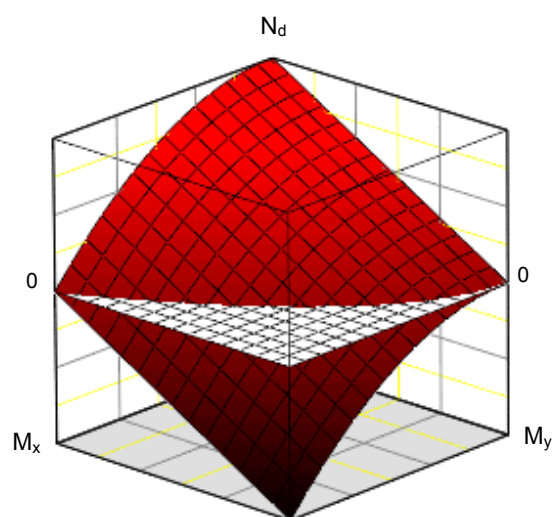


Figura 3.6 – Representação da superfície estável sujeita à flexo-compressão oblíqua, segundo a norma australiana.

3.3 Confrontação com a CSA 086.1/89

A norma canadense restringe a esbeltez das peças comprimidas ao valor máximo de 50. Assim, o máximo comprimento efetivo (L_e) das barras com seção transversal retangular é determinado por $50 \cdot b$ ou $50 \cdot h$. O cálculo do índice de esbeltez destas peças, segundo as Expressões [2.85] e [2.86], difere ligeiramente da equação proposta pela norma brasileira, que define este índice pela maneira clássica da Resistência dos Materiais. Por outro lado, a CSA 086.1/89 contempla uma variedade significativa de possibilidades de vinculações das extremidades das barras, conforme Tabela A.3 (Anexo A), oferecendo opções ao projetista não consideradas pela NBR 7190/97.

A resistência de projeto à compressão paralela às fibras é função do fator de esbeltez, K_C , que reflete a influência dos fenômenos de instabilidade no projeto das peças comprimidas e sua determinação fundamenta-se na teoria cúbica de Rankine-Gordon. Na Equação [2.83], a constante indicada no denominador ($N= 35$) é o instrumento utilizado para ajustar a curva aos valores experimentais. A Figura 3.7 mostra o comportamento do fator K_C em função do índice de esbeltez da barra. O gráfico foi obtido considerando-se as propriedades das madeiras canadenses.

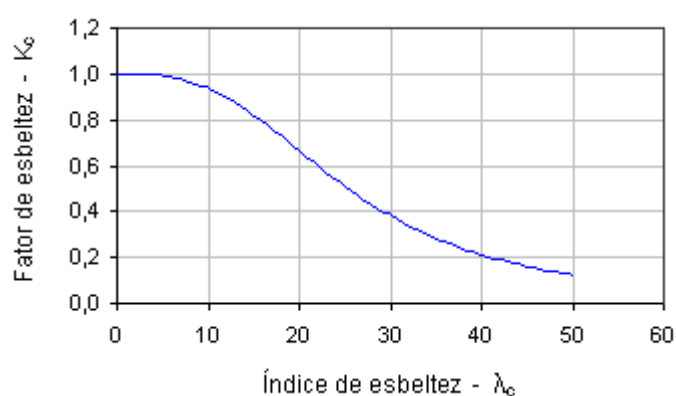


Figura 3.7 – Fator de esbeltez da norma canadense.

Nota-se uma continuidade em todo o intervalo de esbeltez admitido, comportamento que é desejável para os critérios da norma brasileira. Johns (1991) afirma que a facilidade de aplicação da expressão de Rankine-Gordon foi um dos fatores determinantes na escolha desta equação para o código normativo canadense.

Já a Equação [2.89], recomendada para a verificação das peças sujeitas à flexo-compressão, combina linearmente as duas parcelas deste modo de sollicitação. Trata-se de uma expressão objetiva, com transição correta para o caso de compressão pura. A NBR 7190/97 não permite esta transição imediata para a compressão axial, por não considerar os efeitos da flambagem na parcela devida ao esforço axial na Equação [2.24]. Todavia, a CSA 086.1/89 não esclarece suficientemente os critérios para o dimensionamento em casos de flexo-compressão oblíqua.

Para assegurar a estabilidade lateral das peças flexocomprimidas, a norma canadense impõe uma relação máxima entre a altura (h) e a largura (b) da seção transversal, cujos valores são tabelados. Se uma peça é apoiada em suas extremidades, restringindo-se os deslocamentos e rotações, por exemplo, a relação máxima admitida é $h/b = 4$. Nenhuma exigência de excentricidade ou declividade mínima é especificada em seu texto.

A parcela relativa à flexão, na Equação [2.89], é calculada usando-se os valores de projeto do momento fletor de primeira ordem – causado pela ação de um carregamento lateral na barra – aos quais se acrescentam os efeitos de segunda ordem, ou pelo momento fletor provocado pela excentricidade do carregamento, devidamente amplificado. Madsen (1992) afirma que esta equação é muito conservadora para peças curtas.

Uma barra birotulada sujeita a um carregamento de compressão excêntrico, como indicado na Figura 3.1, está sollicitada por um momento de extremidade $M_{sd} = N_{sd} \cdot e_y$, que devidamente amplificado pode ser escrito como:

$$M_{sd} = N_{sd} \cdot e_y \cdot \left(\frac{N_E}{N_E - N_{sd}} \right) \quad [3.2]$$

Se substituído na Equação [2.89], a única incógnita é o valor de cálculo do esforço sollicitante de compressão, N_{sd} , que pode ser encontrado sem nenhuma dificuldade, uma vez que a expressão resultante é do 2º grau.

3.4 Confrontação com o EUROCODE 5/93

Embora o EUROCODE 5/93 e a norma brasileira tenham uma mesma roupagem – em que são empregados inclusive os mesmos símbolos –, analisando-se detalhadamente esses documentos pode-se constatar divergências significativas nas recomendações propostas para o dimensionamento das peças comprimidas e flexocomprimidas. De início, destaca-se que o EUROCODE 5/93 não limita a esbelteza destas peças, como faz a NBR 7190/97.

Outrossim, o EUROCODE 5/93 não esclarece suficientemente como são calculados os comprimentos de flambagem das peças, sendo necessário recorrer a textos complementares para a sua elucidação, tal como o de Blass (1995a). No caso de estruturas treliçadas, a norma europeia permite uma análise simplificada na determinação dos esforços em suas barras, considerando os nós como rótulas e que o comprimento efetivo das peças comprimidas seja igual ao seu comprimento real ou variando de 0,6 a 0,8 vezes o comprimento do vão, dependendo do caso. Para o caso de pórticos planos, esta norma indica que as tensões provocadas por imperfeições geométricas e deformações induzidas devem ser calculadas por uma análise linear de segunda ordem, aplicando-se um ângulo de inclinação, ϕ , e uma curvatura inicial correspondente a uma excentricidade que deve ser no mínimo igual a $e = 0,003 \cdot L$.

Para facilitar o dimensionamento, o EUROCODE 5/93 introduziu um equacionamento empírico para o projeto de peças comprimidas ou flexocomprimidas – Equações [2.98] e [2.99], que é capaz de verificar os casos de flexo-compressão oblíqua. O cálculo do esforço axial último, no desenvolvimento destas expressões, foi realizado a partir de simulações numéricas em computadores e fundamentado numa análise plástica de segunda ordem. Mesmo requerendo um maior tempo de processamento, causado pelos necessários procedimentos iterativos, este método conduziu a esforços axiais últimos maiores que aqueles baseados em uma solução elástica.

Miotto & Dias (2002a) e (2002b) observaram que, embora o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97 tenham inegáveis semelhanças, na verificação da estabilidade das peças elas divergem consideravelmente. A norma europeia considera apenas momentos de primeira ordem nas suas respectivas expressões. Obviamente que os efeitos de segunda ordem foram contemplados nas simulações numéricas que conduziram às regras estabelecidas pelo documento normativo. Gehri (2000) comenta que, assim, a fórmula proposta pela norma

européia é fácil, compreensível, de aplicação segura e com transição correta para a compressão pura.

Um grupo expressivo de fatores, comenta Blass (1995b), influencia na resistência de uma peça comprimida, envolvendo desde as variações nas características do material até as prováveis imperfeições geométricas, destacando-se a curvatura inicial, a inclinação do eixo da peça e as divergências nas dimensões nominais da seção transversal. No entanto, pelas dificuldades do engenheiro obter tais informações antecipadamente, o EUROCODE 5/93 considera a sua influência implicitamente nas regras de projeto. A norma européia limita o desvio no alinhamento inicial do eixo das peças em $L/300$, para que seja válido o valor de $\beta_c = 0,2$ para as madeiras serradas. Já a NBR 7190/97 propõe este valor como uma excentricidade accidental mínima.

Com a consideração de uma resistência à compressão modificada, o EUROCODE 5/93 trata as condições de estabilidade das peças comprimidas como um simples caso de verificação de resistência. Observa-se que há uma imposição de critérios de natureza distinta na obtenção da curva de flambagem, ou seja, quando $\lambda_{rel} \leq 0,3$ prevalecem as condições de resistência da peça – Expressões [2.94] e [2.95]. Acima desse limite, são válidas as Equações [2.98] e [2.99]. A parcela relativa ao esforço axial de compressão, nestas expressões, é afetada por um coeficiente de correção, k_c , que considera os efeitos da flambagem.

A Figura 3.8 ilustra os valores de k_c em função da esbeltez relativa. O trecho horizontal da figura ($\lambda_{rel} \leq 0,3$) é resultado das imposições do EUROCODE 5/93 para as peças curtas, em que a resistência da madeira é a condição de ruptura determinante. Não fosse a prescrição normativa para esse intervalo, a curva esboçada seguiria em um ramo ascendente. Para $\lambda_{rel} > 0,3$, a expressão proposta pelo documento normativo europeu gera uma curva isenta das discontinuidades que caracterizam a curva equivalente segundo a NBR 7190/97. Os dados utilizados para o traçado do diagrama referem-se às madeiras européias.

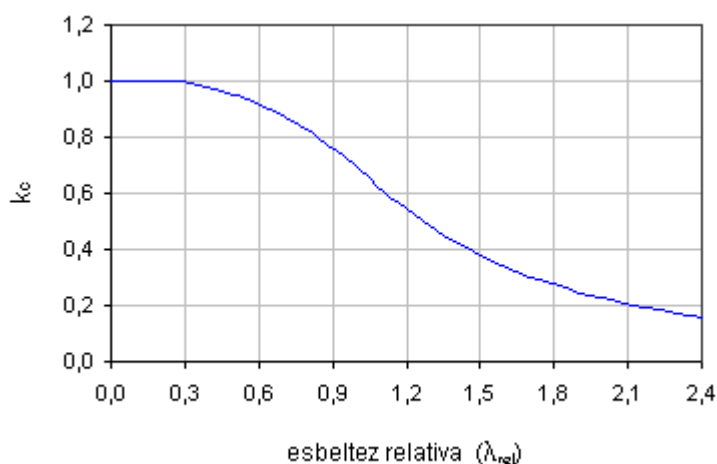


Figura 3.8 – Fator de esbeltez da norma européia.

Tornando-se nulos os termos da flexão nas Equações [2.98] e [2.99], é possível se constatar que o coeficiente k_c é uma forma parametrizada de relacionar as tensões de compressão com a resistência à compressão na direção paralela às fibras, ou seja,

$$k_{c,z} = k_{c,y} = \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \quad [3.3]$$

Da equação anterior é possível, então, concluir que o valor de projeto do esforço axial de compressão pode ser obtido pela expressão:

$$N_d = A \cdot f_{c,0,d} \cdot k_c \quad [3.4]$$

Adotando-se o mesmo procedimento anterior, a partir da Equação [2.94] determina-se o coeficiente $k_{c,z} = 1,0$ para $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$ e, assim, nesse intervalo, o máximo esforço axial de compressão – valor de projeto – é encontrado segundo a Equação [3.5], que coincide com o equacionamento da NBR 7190/97 para peças curtas.

$$N_d = A \cdot f_{c,0,d} \quad [3.5]$$

Supondo uma peça de seção transversal retangular, conforme se mostra na Figura 3.1, a partir da Equação [2.98] é fácil se obter uma equação que conduz ao valor do esforço normal de projeto:

$$N_d = \frac{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d} \cdot f_{m,z,d}}{\frac{f_{m,z,d}}{A} + \frac{6 \cdot e_y \cdot k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}}{h \cdot b^2}} \quad [3.6]$$

A NBR 7190/97 não admite, no caso das peças esbeltas, a obtenção de uma expressão objetiva, como a equação acima, devido à complexidade de suas recomendações.

3.5 Confrontação com a NDS/91

As condições de estabilidade das peças comprimidas são avaliadas a partir da esbeltez modificada, segundo a NDS/91, em que se relaciona – para seções transversais retangulares – o comprimento efetivo e a dimensão da seção transversal na direção considerada. De forma similar ao documento canadense, a NDS/91 limita em 50 o índice de esbeltez das peças de madeira serrada. Comparando-se esse índice com aquele proposto pela NBR 7190/97, é possível escrever:

$$\lambda = \frac{L_0}{i_{\min}} = \frac{L_0 \cdot \sqrt{12}}{b} = \frac{L_e}{b} \cdot 3,46 \quad [3.7]$$

Substituindo-se o valor da esbeltez máxima assumida pela NDS/91 na equação anterior, nota-se que essa norma permite que a esbeltez alcance o valor de 173, ou seja, bem acima do permitido pela NBR 7190/97. Como se vê na Tabela A.4 (Anexo A), o documento normativo norte-americano apresenta alternativas de vinculação das barras não contempladas pela norma brasileira.

A verificação das peças comprimidas procede do atendimento à condição estabelecida na Equação [2.111]. Nessa expressão, a tensão admissível de compressão paralela às fibras é função do fator de estabilidade, C_p , calculado pela equação desenvolvida por Ylinen. Um aspecto interessante é que a tensão admissível, assim obtida, resulta de uma curva que é contínua – conforme Figura 3.9 – em todo o intervalo de possibilidades de esbeltez da peça. Conhecidos os fatores de ajuste pertinentes e a área da seção transversal, a determinação do esforço axial de compressão admissível torna-se imediata.

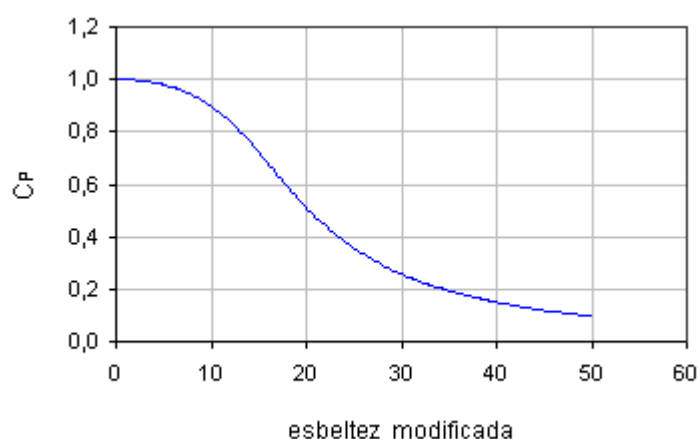


Figura 3.9 – Fator de esbeltez da norma NDS/91.

Os valores do módulo de elasticidade, listados pela NDS/91, são valores médios. A expressão para o cálculo de σ_{cE} inclui um ajuste que converte o valor médio do módulo de elasticidade ao valor referente ao 5º quantil da distribuição estatística dos valores experimentais, embutido no valor de K_{cE} . Em muitas situações, comentam Breyer et al. (1999), alguma excentricidade acidental pode estar presente devida à não-uniformidade dos apoios. Frequentemente esses efeitos são assumidos como compensados pelas recomendações da NDS/91, não havendo qualquer limitação ou imposição de excentricidades nesse documento.

Ressalta-se a facilidade no dimensionamento proporcionada pela inclusão do fator de estabilidade. Esse parâmetro, além de considerar a interação entre os efeitos da instabilidade e da resistência do material, pode ser ajustado aos dados experimentais pela manipulação do coeficiente “c” que aparece na Equação [2.120].

Já as peças flexocomprimidas são verificadas por uma expressão de interação desenvolvida por Zahn, representando um tratamento unificado entre a flambagem de peças comprimidas, flambagem lateral de vigas e a interação viga-coluna. Anulando-se os termos da flexão lateral na Equação [2.122], tem-se uma transição correta para a compressão axial.

A partir da Equação [2.126], se obtêm as curvas que simulam a interação entre a compressão axial e a flexão, indicadas na Figura 3.10. Uma das possibilidades é relacionar a tensão σ_{c0} com a tensão admissível à compressão paralela às fibras (σ'_{c0}). No entanto, relacionando-a

com a tensão admissível à compressão paralela às fibras de peças curtas (σ_{c0}^*), torna-se mais evidente o efeito da flambagem na determinação do esforço admissível.

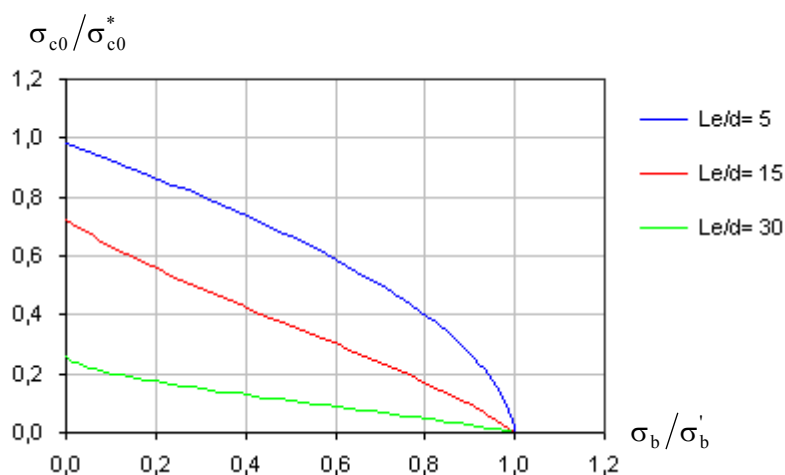


Figura 3.10 – Curvas de interação para peças flexocomprimidas, com diferentes índices de esbeltez, segundo a NDS/91.

Situações de dimensionamento envolvendo a excentricidade inicial do carregamento, associada com carregamentos laterais, são resolvidas pela Equação [2.127]. Embora a quantidade de fatores envolvidos nessa equação torne-a demasiadamente extensa, é fácil perceber a contribuição de cada parcela na interação. Tornando-se nulas as tensões devidas aos carregamentos laterais, σ_{bx} e σ_{by} , a expressão resultante é válida para peças sujeitas apenas ao esforço axial excêntrico. Por outro lado, não havendo a força axial de compressão, essa expressão se transforma na que permite a verificação da flexão biaxial (oblíqua).

3.6 Confrontação com a AF&PA/ASCE 16-95/96

Embora fundamentada em um outro método de verificação das condições de segurança estrutural, a AF&PA/ASCE 16-95/96 evidencia relações notáveis com a NDS/91. Um exemplo disto está na recomendação do uso dos fatores de ajuste contidos na NDS/91, quando não houver referência específica em seu texto.

Esta norma adota o modelo tradicional de representação do índice de esbeltez, assemelhando-se, assim, às prescrições da NBR 7190/97. Ao assumir uma esbeltez máxima

de 175, a AF&PA/ASCE 16-95/96 reafirma o limite estabelecido na NDS/91, situando-se bem acima daquele estabelecido pela norma brasileira. Sendo válidos os coeficientes de comprimento de flambagem, K_e , adotados pela NDS/91, também se pode afirmar que esta norma flexibiliza as condições de vinculação das barras, quando confrontada com o documento normativo brasileiro.

Percebe-se que esta norma não conduz, obrigatoriamente, o projetista a verificar a possibilidade de flambagem segundo diferentes planos. Neste aspecto, a NBR 7190/97 e a AF&PA/ASCE 16-95/96 se equiparam, contando com a experiência do projetista na inspeção da situação crítica.

A utilização do módulo de elasticidade longitudinal ajustado ao 5º quantil da distribuição de frequências permite a apresentação das fórmulas de estabilidade em um formato familiar, como o indicado pela Equação [2.136]. No entanto, esta norma se difere da NDS/91, que apesar de também adotar o módulo de elasticidade ajustado, o faz incorporando constantes numéricas nas expressões.

A equação proposta pela AF&PA/ASCE 16-95/96 para a determinação do valor de projeto da resistência à compressão paralela às fibras – Equação [2.132] – depende diretamente do fator de estabilidade de peças comprimidas, C_p . Esse fator é função da razão entre o esforço crítico de Euler e da resistência de cálculo de peças curtas à compressão paralela às fibras, denotada pelo parâmetro α_c . A influência de α_c no fator de estabilidade está esboçada na Figura 3.11 para diferentes valores da constante “c”.

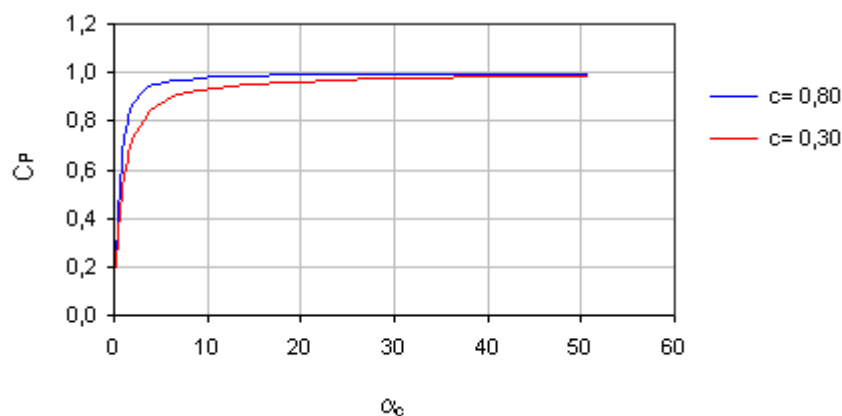


Figura 3.11 – Variação do fator de estabilidade em função de α_c .

Em peças muito curtas, o valor de α_c cresce rapidamente, fazendo com que o módulo de C_p se aproxime da unidade para os diferentes valores de “c”, e assim, não influenciando na resistência de projeto dessas peças.

Como a equação para a obtenção do fator de estabilidade de peças comprimidas, C_p , tem a mesma base teórica adotada pela NDS/91, a curva resultante tem o mesmo aspecto daquela esboçada na Figura 3.9, exceto que agora ela é função da esbeltez tradicional, conforme a Figura 3.12. Estes critérios conduzem a uma notável objetividade na obtenção da resistência de cálculo e a uma continuidade da curva resultante.

Nos critérios estabelecidos por esta norma, também não constam excentricidades mínimas obrigatórias, como faz o documento normativo brasileiro. Impondo-se uma excentricidade inicial no carregamento, a peça simplesmente é dimensionada para resistir à flexo-compressão.

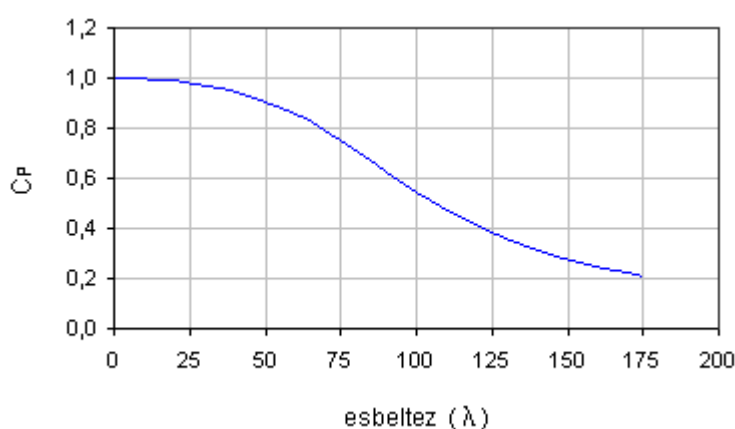


Figura 3.12 – Fator de esbeltez da norma AF&PA/ASCE 16-95/96.

A expressão proposta pela AF&PA/ASCE 16-95/96 para a verificação das peças flexocomprimidas conduz a uma correta transição para a compressão axial, sendo válida para os casos de flexão oblíqua e flexo-compressão oblíqua. O quadrado do termo da compressão axial caracteriza um dimensionamento menos conservador – confirmado pelas pesquisas de Zahn – que aquele obtido pela combinação linear entre as parcelas da flexão e do esforço axial, como se verifica na Figura 3.13.

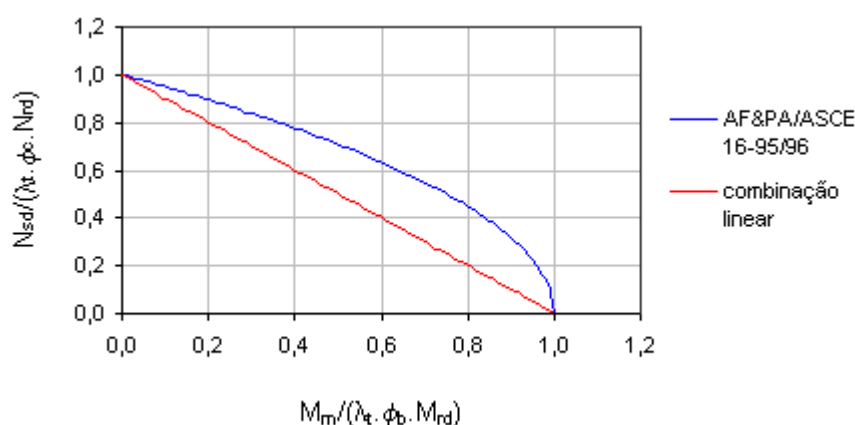


Figura 3.13 – Interação entre a flexão e o esforço axial de compressão.

Na verificação da flexo-compressão, a AF&PA/ASCE 16-95/96 não faz nenhuma distinção entre os momentos fletores provenientes de diferentes fontes, tais como os gerados pela excentricidade dos esforços axiais e por solicitações transversais. Estes momentos são agrupados em uma única parcela, diferenciando-se assim do procedimento adotado pela NDS/91. Como os momentos solicitantes que aparecem na Equação [2.137] incluem os efeitos de segunda ordem, eles receberam uma designação especial para se evitar confusões.

Uma grande parte das estruturas de madeira são contraventadas, ao invés de se equipararem a pórticos rígidos. Assim, os momentos de primeira ordem (M_{bx} ou M_{by}) são a única categoria, comumente, que precisa ser considerada.

Todos os amplificadores dos momentos de primeira ordem, determinados pelas Equações [2.144] a [2.147], possuem um denominador cujo valor máximo é unitário e que diminui na medida em que o esforço axial aplicado se aproxima da carga crítica de Euler multiplicada pelo fator de resistência para a compressão paralela à fibras, ϕ_c . Logo, nesta condição, os amplificadores assumem os seus máximos módulos, podendo assumir imensos valores para altos índices de esbeltez.

A NBR 7190/97 não menciona as formas alternativas de aplicação do carregamento axial de compressão, por exemplo, utilizando-se braçadeiras ou cantoneiras que são fixadas lateralmente ao pilar e previstas pela AF&PA/ASCE 16-95/96, que podem provocar grandes excentricidades no esforço axial e conduzir a esforços de flexão significativos.

3.7 Considerações complementares

O dimensionamento das peças comprimidas de madeira é influenciado pela sua esbelteza, compreendendo uma interação entre os dois modos básicos de ruptura (resistência e instabilidade), que geralmente não é linear. Vários autores propuseram relações adotadas pelos códigos normativos, que indicam uma interação não-linear.

Comparando-se os critérios de verificação da instabilidade das peças comprimidas, propostos pelos documentos normativos aqui analisados, nota-se a sutileza de suas similaridades. Além do emprego dos fatores de correção, para considerar as particularidades devidas ao uso da estrutura, cada qual acrescenta fatores para expressar as condições de estabilidade, que são baseados em diferentes teorias: fórmula de Ylinen, no caso das normas norte-americanas, Rankine-Gordon na norma canadense, ajustes simplificadores na norma australiana e o procedimento numérico no caso da norma européia.

As peças flexocomprimidas, por sua vez, são tratadas no processo de dimensionamento como um caso de interação entre compressão axial e flexão. Nesse caso, surge o efeito de segunda ordem causado pela excentricidade do carregamento e as fórmulas de interação pretendem manipular as combinações de tensões resultantes desse tipo de sollicitação. Para tal sollicitação não há uniformidade no tratamento sugerido pelas normas. A norma alemã propõe uma expressão de interação linear, em que a tensão admissível de flexão é afetada por um coeficiente de flexão e a tensão admissível de compressão é modificada segundo a esbelteza da peça. O texto da norma australiana afirma que as expressões propostas para a verificação das peças flexocomprimidas são baseadas em um critério conservador, que já contém uma compensação para os efeitos de amplificação do momento fletor devido ao carregamento axial. O documento normativo canadense adota uma condição de interação linear entre a compressão e a flexão, considerando que o momento fletor solicitante na expressão seja resultado da soma dos momentos de primeira e segunda ordem. A expressão proposta pela norma norte-americana baseada nos estados limites (LRFD) inclui fatores amplificadores nos momentos (M_m), deixando clara a consideração dos efeitos de segunda ordem.

Nem sempre ilustrada com muita clareza nas expressões normativas estudadas, a fluência é outro fator que interfere diretamente no comportamento das peças comprimidas e flexocomprimidas. Para a compensação desse efeito, algumas normas indicam a utilização

do módulo de elasticidade referente ao quinto quantil da distribuição de freqüências, modificado por fatores específicos de condições de uso e tipo de sollicitação, como é o caso do EUROCODE 5/93.

A fluência é considerada, pela CSA 086.1/89, no lado das sollicitações da expressão geral de verificação do método dos estados limites ($S_d \leq R_d$). Ou seja, os esforços gerados pelas reduções e aumentos nas dimensões das peças causados por mudanças de temperatura, retração, trocas de umidade, fluência, recalques de apoio ou suas combinações, são determinados, geralmente, por métodos baseados na hipótese de comportamento elástico do material.

A norma australiana, por sua vez, leva em conta os efeitos da fluência através do fator de estabilidade. Sob efeito das ações de longa duração, há um efeito de fluência adicional que é considerado indiretamente na constante material, ρ .

Na NDS/91 afirma-se que o efeito da fluência é considerado, em peças sujeitas à flexão, limitando-se as deformações causadas pelas ações de longa duração. Na AF&PA/ASCE 16-95/96, os efeitos da fluência, da variação na rigidez do material e de pequenas excentricidades acidentais são contemplados pelo fator de estabilidade, ϕ_s .

A norma alemã considera o efeito da fluência no cálculo das deformações devidas à flexão. Assume-se que as deformações de fluência são proporcionais às deformações elásticas da peça flexionada. Sua análise é exigida se o peso próprio excede em 50% ao carregamento global incidente. A DIN 1052/88 apresenta equações que permitem o cálculo do índice de fluência de peças estruturais em função do peso próprio e do carregamento global.